

IN PRINCIPIO FU IL TRANSISTOR

Il transistor è una delle invenzioni più innovative del secolo appena trascorso ed è anche alla base delle attuali tecnologie elettroniche e informatiche, utilizzato sia come amplificatore, sia come interruttore.

Nel fascicolo 12 abbiamo iniziato a trattare le proprietà dei semiconduttori e abbiamo osservato cosa accade unendo due strati di silicio sottoposti a processi di drogaggio 'p' e 'n'. Una delle rivoluzioni

più significative per l'elettronica moderna, però, è iniziata quando, negli anni quaranta del XX secolo, i laboratori della Bell hanno sperimentato i primi **transistor a giunzione bipolare** (più brevemente **BJT**).

La struttura fisica di questi nuovi dispositivi è, per certi versi, analoga a quella dei diodi: anch'essi traggono le loro proprietà da semiconduttori drogati, ma a differenza dei diodi, che sfruttano una singola giunzione 'pn', i **BJT operano grazie a tre strati di semiconduttore con drogaggi alternati**.

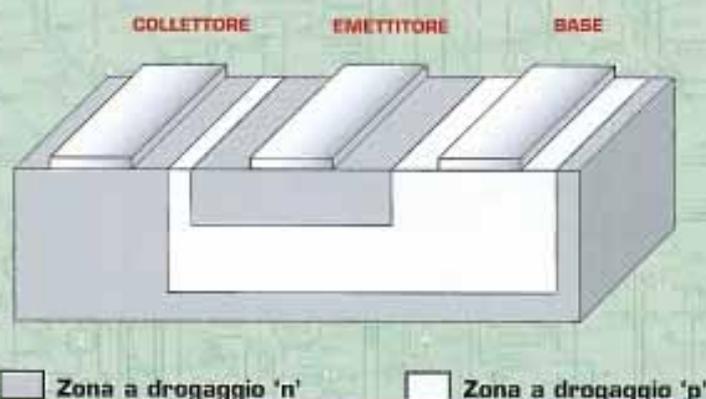
Si parla, allora, di **BJT 'npn'** e di **BJT 'pnp'**, in funzione del tipo di drogaggio utilizzato nella realizzazione. A livello pratico, il comportamento di queste due famiglie di dispositivi è simile, anche se, a causa della loro struttura complementare, operano in maniera opposta.

IL FUNZIONAMENTO DEI BJT

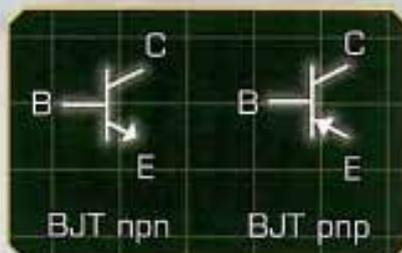
Poiché un'analisi completa del funzionamento dei transistor è molto lunga e complessa, ci limiteremo a osservare come operano sotto un profilo esclusivamente 'pratico', senza, cioè, valutare gli aspetti matematici derivanti dalla fisica dei semiconduttori (al momento **faremo riferimento ai transistor di tipo npn**). Iniziamo osservando i simboli elettrici delle due famiglie contenuti nell'immagine in basso della pagina successiva. La prima cosa che si nota è che, rispetto al diodo, il transistor è un **componente a tre terminali**, detti **collettore (C)**, **base (B)** ed **emettitore (E)**, ognuno dei quali è connesso a una specifica zona di semiconduttore drogato (la struttura interna è visibile nell'immagine in alto della pagina seguente). Ora, analizziamone il funzionamento aiutandoci con una 'semplificazione' attuabile partendo proprio dalla struttura

Nella foto, una ricostruzione del primo transistor proposto dai laboratori Bell. A lato, alcuni BJT moderni con diversi 'package'.

LA STRUTTURA INTERNA DI UN TRANSISTOR A GIUNZIONE BIPOLARE NPN



interna. Abbiamo già detto che i BJT npn sono formati da tre zone di materiale drogato e che a ognuna di esse corrisponde uno dei tre terminali elettrici del dispositivo. Se osserviamo il BJT dal terminale di base B (schema dell'immagine a destra): ci accorgiamo della presenza di una **doppia giunzione pn** (una tra B e C e l'altra tra B ed E), la stessa struttura di silicio che si trova alla base del diodo. Un transistor a giunzione bipolare, quindi, può in qualche modo essere paragonato a una coppia di diodi posti ad anodo comune (per gli npn) o a catodo comune (per i pnp). Proviamo a sfruttare questo modello 'a doppio diodo' per descrivere il funzionamento dei BJT npn.

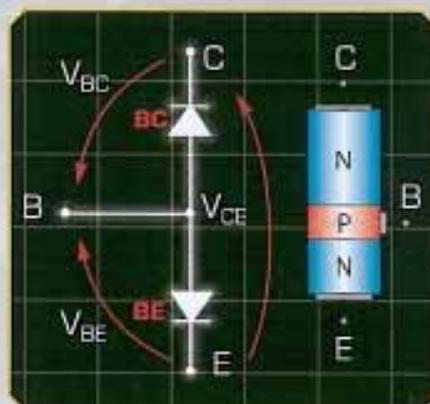


🔗 I simboli utilizzati per indicare i BJT npn e pnp. Sono distinguibili per il verso della freccia, che richiama il verso dei diodi equivalenti alle giunzioni pn interne.

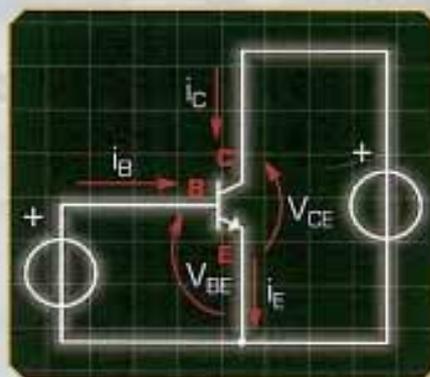
GLI STATI DI FUNZIONAMENTO

Iniziamo ponendo il transistor secondo una particolare configurazione, che viene detta 'a emettitore comune' (figura in basso a destra). Immaginiamo di avere tra B ed E una tensione nulla o negativa: entrambe le giunzioni identificate nel modello a doppio diodo sarebbero polarizzate in modo inverso. Ciò inibisce il flusso di qualsiasi corrente: il transistor si trova in quello che viene detto **stato di interdizione** o di **cut off** (si comporta, in pratica, come un **interruttore aperto** posto tra C ed E). Ora immaginiamo di aumentare gradualmente la **tensione tra B ed E (V_{BE})**: nel momento in cui superiamo la **tensione di soglia** della giunzione BE (nei transistor al silicio oscilla tra 0,7 a 0,8 V), **BE passerà in stato di conduzione**, mentre la giunzione BC sarà ancora **interdetta**. Il BJT entra nella 'regione attiva diretta'. In tali condizioni, si crea una corrente entrante nella base (i_B) che percorre la giunzione BE producendo un effetto fisico fondamentale per il transistor:

🔗 A lato, la struttura di un BJT npn. Sotto, il modello a doppio diodo di un BJT npn accanto allo schema delle giunzioni interne del transistor (si notano le due giunzioni pn tra i terminali BE e tra i terminali BC).



dà origine a un flusso di **corrente entrante dal collettore** (indicata con i_C) **proporzionale alla corrente di base** (amplificazione). In termini matematici, tale proporzionalità è descritta attraverso un fattore ' β_F ' che prende il nome di **guadagno di corrente diretto a emettitore comune**. Maggiore è il valore di questo fattore e maggiore è l'amplificazione del transistor (di solito β_F è dell'ordine di alcune centinaia di unità). In condizioni statiche, l'amplificazione viene spesso indicata con il parametro h_{FE} .



🔗 Un BJT npn disposto 'a emettitore comune'.

| Giunzione Base-Elettore | Giunzione Base-Collettore | |
|-------------------------|--|---|
| | Polarizzazione diretta | Polarizzazione inversa |
| Polarizzazione diretta | Regione di saturazione (circuito chiuso) | Regione attiva diretta (o normale) (buona amplificazione) |
| Polarizzazione inversa | Regione attiva inversa (scarsa amplificazione) | Regione di interdizione (circuito aperto) |

definito come il rapporto tra le correnti i_C e i_B (di solito viene comunicato assieme alle condizioni operative a cui è stato rilevato; l'amplificazione varia in base alle correnti in gioco e alla temperatura di lavoro). Poiché la corrente uscente dall'emettitore (i_E) deve essere pari alla somma delle correnti entranti da B e da C, in regione attiva diretta è possibile esprimere i_E con l'equazione:

$$i_E = i_B + i_C = i_B + \beta_F \cdot i_B$$

Immaginiamo, ora, di aumentare ulteriormente la tensione V_{CE} sino a un valore tale da portare anche la giunzione BC in stato di conduzione. Quando raggiungiamo tali condizioni si dice che il transistor opera in regione di saturazione, un particolare stato nel quale i BJT sono paragonabili 'quasi' a circuiti chiusi (come se il collettore e l'emettitore fossero collegati direttamente tra di loro). Si perde, quindi, la proporzionalità tra i_B e i_C . Esiste anche un ulteriore caso di funzionamento dei BJT, che si verifica con BC in conduzione e BE interdetta. Data la teorica simmetria strutturale del dispositivo, è logico aspettarsi che il BJT operi in modo simile alla regione attiva diretta

(che prevede BE in conduzione e BC interdetta); tuttavia, la reale differenza tra le due zone 'n' dà origine a un fattore di amplificazione ' β_R ' che è nettamente inferiore rispetto al valore ' β_F ' visto in precedenza (zona attiva inversa).

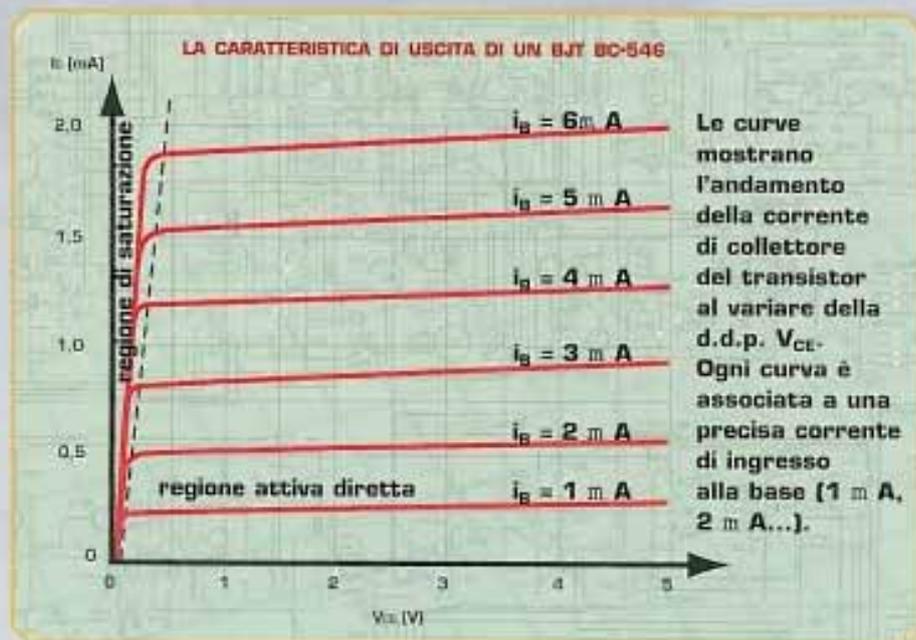
LE CURVE CARATTERISTICHE DEI BJT

Il mercato mette a disposizione un gran numero di transistor, differenti per amplificazione, dimensioni ecc. Per conoscere le specifiche di funzionamento dei singoli componenti si fa normalmente ricorso a una serie di grafici (allegati nella documentazione dei produttori), che aiutano a descriverne in modo visuale le caratteristiche

Tabella riassuntiva del funzionamento dei BJT.

operative. Vediamo sotto, come esempio, il **diagramma di uscita a emettitore comune** di un BJT modello BC-546 (tipo npn). Il significato di questo grafico è semplice: sull'asse delle ascisse viene rappresentata la tensione V_{CE} , su quello delle ordinate la corrente i_C . Ogni curva, invece, è associata a una specifica corrente i_B e descrive l'andamento di i_C al variare della tensione V_{CE} del transistor. La linea tratteggiata segna, invece, il 'confine' tra la regione di saturazione (a sinistra) e la regione attiva diretta (a destra). Si può osservare come, nel caso della regione attiva, con lievi variazioni di V_{CE} la corrente i_C rimanga pressoché costante, mentre in regione di saturazione tale evento causi uno sbalzo evidente della corrente i_C .

Il diagramma di uscita di un BJT BC-546. Descrive l'andamento della corrente i_C in funzione di V_{CE} e i_B .



STEPbySTEP

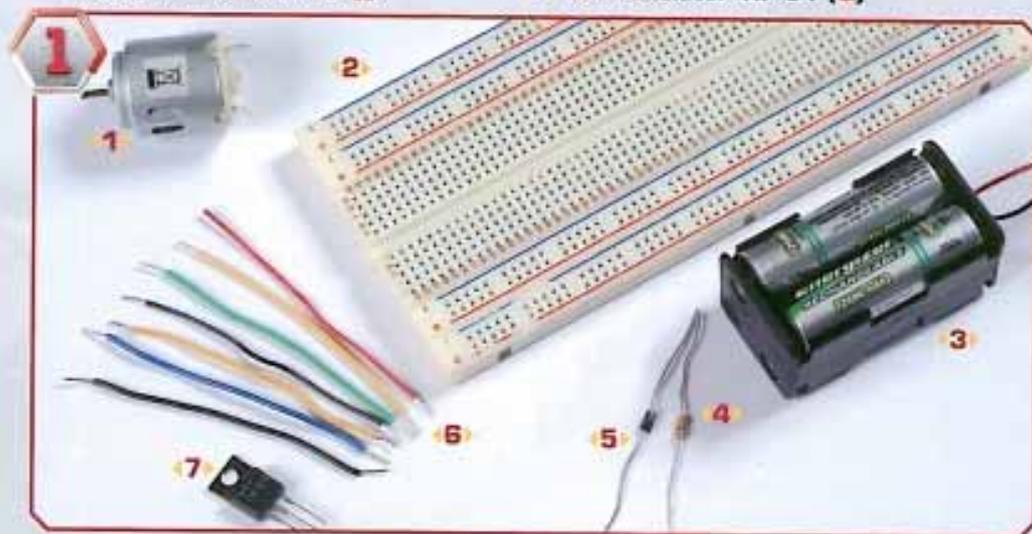
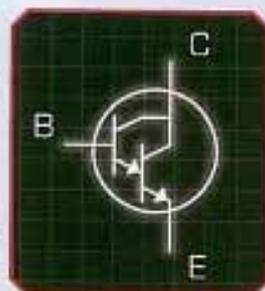
PILOTIAMO UN MOTORE ▶▶▶

L'esperimento di questo StepbyStep ti permetterà di comprendere come è possibile sfruttare le capacità di amplificazione dei transistor per azionare un motore a partire da un segnale di bassa intensità. Per ora, il tipo di controllo sarà estremamente semplice, ma ti permetterà di acquisire le basi utili per capire come operano sistemi più complessi, come gli indispensabili **H-bridge**, che consentono di pilotare i motori DC in modo più completo, caratteristica fondamentale nell'attuazione dei robot. In questo esperimento utilizzerai un transistor per applicazioni di media potenza di tipo **TIP-31**.

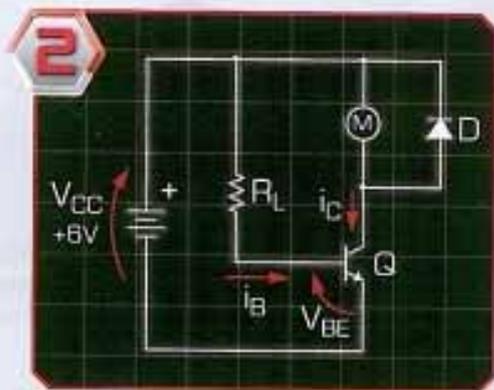
Nelle applicazioni pratiche, spesso si ricorre a dispositivi **Darlington** (immagine a lato), realizzati per mezzo di due BJT accoppiati. In questi componenti, ne sono un esempio i **TIP-100**, il fattore di amplificazione è elevatissimo (anche pari a 1000 unità), proprio poiché viene sfruttato l'effetto di due amplificazioni consecutive.

Elementi richiesti:

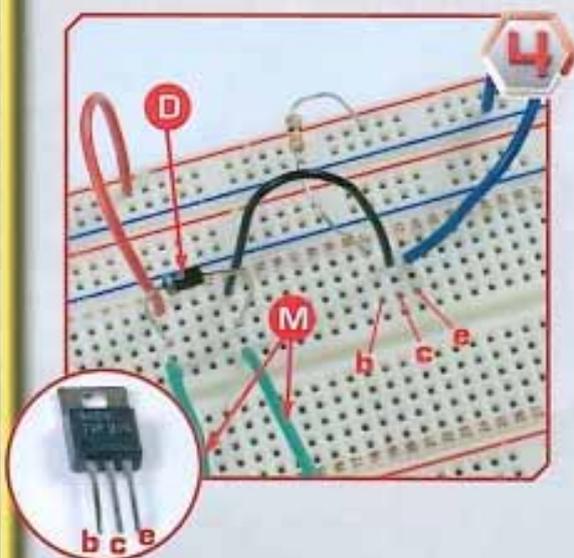
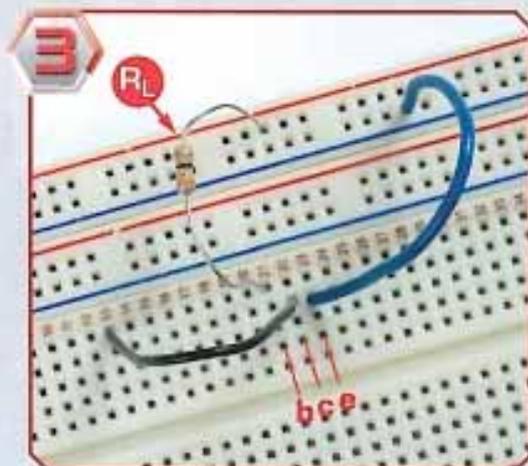
- 1 un motorino elettrico (M)
- 2 una breadboard
- 3 un portatile con 4 batterie stilo meglio se ricaricabili (V_{CC})
- 4 un resistore da 330 ohm (R_L)
- 5 un diodo 1N4001 (D)
- 6 fili per breadboard
- 7 un transistor TIP-31 (Q)



Il circuito da realizzare è quello che vedi mostrato nello schema a lato. Quella che sperimenterai ora è una situazione molto comune nell'ambito dei robot, che ti si riproporrà quando vorrai 'pilotare' un carico che richiede una potenza medio alta (come i motori DC, in questo caso, o un relè) con un segnale relativamente debole, come quello proveniente dai circuiti logici o dai microcontrollori. Nei prossimi fascicoli sperimenterai anche un sistema più complesso, chiamato **H-bridge**.



Innanzitutto disponi il resistore R_L da 330 ohm tra la linea '+' della breadboard e una delle linee di socket centrali. Posiziona due fili nelle linee accanto al foro dove hai inserito il resistore R_L , come mostrato nella foto. Collega quello più esterno alla linea '-' della breadboard. Ognuna delle tre linee che hai appena utilizzato dovrà essere collegata a uno dei pin del transistor. In particolare, il resistore sarà connesso alla base e avrà lo scopo di 'limitare' la corrente i_B , mentre i fili nero e blu saranno collegati rispettivamente al motore elettrico e alla linea '-' (massa).



Ora collega il motore elettrico con due fili per breadboard (nella foto noi abbiamo utilizzato i due fili verdi). Inserisci in parallelo al motore il diodo 1N4001, come mostrato nello schema elettrico iniziale, ossia con verso di polarizzazione invertito rispetto al senso convenzionale della corrente i_C del circuito. Quando si utilizzano componenti induttivi (come i motori o i relè) pilotati da un transistor, è consigliabile inserire un diodo che permetta di 'scaricare' i picchi di tensione creati dagli elementi induttivi, che altrimenti danneggerebbero il transistor. Inserisci, infine, il TIP-31.

Una volta che hai inserito il transistor puoi collegare l'alimentazione (filo rosso del pacco batterie alla linea '+' e filo nero alla linea '-'). Se avrai montato correttamente il circuito vedrai il motore accendersi per effetto del transistor. Il resistore R_L non fa altro che 'limitare' la corrente in ingresso nel pin di base a un valore che si aggira attorno ai 16 mA (una corrente che può essere paragonata a quella 'emissibile' dalle porte dei microcontrollori che utilizzeremo in futuro). Collegando il resistore al pin di base, tuttavia, 'accendi' la giunzione BE (puoi verificare la presenza di una d.d.p. tra B ed E di ca. 0,70 - 0,80 volt) ottenendo, così, l'effetto di amplificazione che permette la rotazione del motore.

